

**Ю.Б. ДАНИЛОВ**, докт. техн. наук,

**В.Н. КОЛОМИЕЦ**, канд. техн. наук, ОАО «УкрНИИхиммаш»,

г. Харьков, Украина

## **ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРИ ПУЗЫРЬКОВОМ КИПЕНИИ В ОБЪЕМЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КИПЯТИЛЬНИКА ИЗ ФТОРОПЛАСТОВЫХ ТРУБОК**

У роботі досліджені й описані фактори впливу фторопластової тепловіддаючої площини на перенесення тепла при бульбировому кипінні та на інтенсивність тепловіддачі при кипінні. Наведені математичні залежності, що дозволяють прогнозувати вплив різних факторів на механізм та інтенсивність процесу теплообміну при кипінні.

В работе исследованы и описаны факторы влияния фторопластовой теплоотдающей площади на перенос тепла при пузырьковом кипении и на интенсивность теплоотдачи при кипении. Приведены математические зависимости, которые позволяют предсказывать влияние различных факторов на механизм и интенсивность процесса теплообмена при кипении.

In process investigational and described factors of influence of fluoroplastic teplootdayuschey area on the transfer of heat at the bubble boiling and on intensity of heat emission at boiling. We present mathematical relationships that allow predicting the influence of various factors on the mechanism and intensity of heat transfer during boiling.

В процессе исследования теплоотдачи при кипении в экспериментальном кипятильнике из фторопластовых труб режимные параметры изменялись в следующих пределах:

- поверхностная плотность теплового потока от 4578 до 10698 Вт/м<sup>2</sup>;
- давление греющего пара – от 0,1 до 0,2 МПа;
- скорость греющего пара – от 27 до 54 м/с;
- расход греющего пара – от 0,16 до 0,39 кг/с.

Конструкция исследуемого выносного кипятильника отбелочной колонны с объемными нагревателями из фторопластовых труб обеспечивает кипение в большом объеме, т.е. кипение на поверхности нагрева, погруженной в емкость с первоначально неподвижной жидкостью.

Процесс кипения, когда давление насыщенного пара вещества равно внешнему давлению, а парообразование происходит по всему объему жидкости, широко используется в энергетике, химической и других отраслях

промышленности. В нашем случае в процессе кипения азотной кислоты происходит выделение окислов азота. Необходимым условием передачи тепла от твердой поверхности к кипящей жидкости является перегрев поверхности относительно температуры насыщения. При малых разностях температур стенки теплообменной трубки и жидкости ( $\Delta T = T_{нов} - T_n$ ) пузырьки пара зарождаются в малом числе центров парообразования, их перемешивающий эффект для всей поверхности теплообмена остается незначительным, и интенсивность теплообмена определяется процессом свободной конвекции жидкости около нагретой поверхности фторопластовых труб.

По мере увеличения перегрева поверхности число роста пузырьков быстро увеличивается и увеличивается частота их отрыва от поверхности. Это способствует увеличению интенсивности перемешивания жидкости у стенки и во всем объеме и соответствующему повышению коэффициента теплоотдачи.

При некотором значении  $\Delta T = \Delta T_{кр}$ , для существующих конструкций кипятильников из металла, пузырьки у поверхности трубки перестают открываться индивидуально и сливаются в сплошную паровую пленку, которая блокирует горячую поверхность теплопередающих трубок от жидкости. Данное явление называется кризисом кипения. При этом значение коэффициента теплопередачи уменьшается в 20 – 40 раз, поэтому в промышленности стараются организовать процесс в области развитого пузырькового кипения.

Простейшим случаем пузырькового кипения является кипение на горизонтальной поверхности нагрева в большом объеме. В данном случае механизм процесса передачи теплоты от греющей стенки и жидкости к ее пару не осложнен факторами, препятствующими его пониманию и описанию. Однако аналитически описать данный процесс трудно. Причины этого состоят в сложности описываемого явления.

К основным факторам, определяющим теплоотдачу при кипении, можно отнести теплофизические и физико-химические свойства поверхности нагрева, теплофизические свойства кипящей жидкости.

Экспериментальные данные убедительно свидетельствуют также о том, что свойства материала теплоотдающей поверхности оказывают влияние на перенос теплоты при пузырьковом кипении. Поток теплоты, поступающий от пара к стенке фторопластовой трубки и определяющий мгновенную тепло-воспринимающую способность тела, можно определить по закону теплопро-

водности Фурье и по формуле конвективной теплоотдачи, т.е. вычислениями левой и правой частей граничного условия внешнего теплообмена в системе:

$$\frac{dT}{dt} = a \frac{d^2T}{dx^2} ; -l \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = a(t_f - T \Big|_{x=0}); T \Big|_{t=0} = T_0; \frac{dT}{dx} \Big|_{x \rightarrow \infty} = 0, \quad (1)$$

что даст:

$$q \Big|_{x=0} = -l \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = a(t_f - T \Big|_{x=0}). \quad (2)$$

Количество теплоты, поглощенное единицей поверхности тела от начала процесса нагрева до любого момента времени  $t$ , определится интегрированием уравнения потока теплоты:

$$Q_{(t)} = \int_0^t q \Big|_{(t)} dt. \quad (3)$$

Когда коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  достаточно велик (при  $a/l \rightarrow \infty$ ), температура погружной поверхности тела практически постоянна и равна температуре нагреваемой среды ( $T \Big|_{x=0} = t_f$ ). На погружной поверхности происходит нагрев нагреваемой среды.

Решение системы (1) относительно безразмерной температуры в любой точке полубезграничного тела в любой момент времени:

$$\Theta = \frac{T_{(x,t)} - T_0}{t_f - T_0} = \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a \cdot t}} - \exp\left(\frac{a}{l}x + \frac{a^2}{l^2}a \cdot t\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a \cdot t}} + \frac{a}{l}\sqrt{a \cdot t}\right) \quad (4)$$

в этом предельном случае можно существенно упростить, поскольку второе слагаемое правой части при  $a/l \rightarrow \infty$  стремиться к нулю:

$$\Theta_{(x,t)} = \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a \cdot t}} \quad (5)$$

Полученное уравнение является уравнением распределения температуры.

Уравнение потока теплоты через материал теплопередающей поверхно-

сти можно получить, дифференцируя полученное уравнение распределения температуры (5):

$$q_{(t)} = -I \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = (t_f - T_0) \frac{\sqrt{I \cdot c \cdot r}}{\sqrt{p \cdot t}} \quad (6)$$

В данном уравнении теплофизические константы материала скомпоновались в одной группе  $\sqrt{I \cdot c \cdot r}$ , которая характеризует теплоусвоение материала или коэффициент тепловой активности материала. На его значение имеет наибольшее влияние коэффициент теплопроводности материала  $I$ .

Таким образом, количество теплоты, аккумулированной в материале поверхности, и возможность ее передачи растущему пузырю зависят в первую очередь от теплофизических свойств поверхности (в нашем случае трубки из фторопласта – 4Д), в частности от коэффициента теплоусвоения материала.

$$E = \sqrt{I \cdot c \cdot r} \quad (7)$$

Сток теплоты с поверхности материала происходит через растущие пузыри, образованные на теплообменной поверхности. Центрами парообразования могут быть те элементы поверхности, которые не заполняются жидкостью после отрыва пузыря, это могут быть имеющиеся на поверхности фторопластовых трубок несмывающиеся микровпадины.

На интенсивность теплоотдачи при кипении влияет также толщина греющей стенки. В зависимости от теплопроводности материала поверхности нагрева пульсации температуры, возникающие под растущим пузырем, проникают на ту или иную глубину, т.е. изменяется величина объема поверхности, из которого растущий пузырь отбирает аккумулированную теплоту. Очевидно, чем выше теплопроводность материала, тем на большую глубину проходят пульсации температуры. Если толщина поверхности нагрева меньше возможной глубины их проникновения, скорость подвода теплоты в растущий пузырь снижается, что вызывает общее уменьшение интенсивности теплоотдачи.

Это необходимо учитывать при использовании фторопластовых трубок для конструирования теплообменных аппаратов. Установлено, что в зависимости от температуры теплоносителя глубину проникновения последней в толщину стенки можно описать следующей формулой:

$$\Delta = \frac{dT \cdot l_{CT}}{q} \quad (8)$$

Экспериментальные данные при температуре греющего пара 110 °С и поверхностной плотности теплового потока 4578 – 10698 Вт/м<sup>2</sup> показывают, что такая глубина составляет 0,002 – 0,003 м. Тогда как толщины стенок применяемых фторопластовых трубок составляют 0,0004 – 0,0006 м. Данное явление подтверждается экспериментально различием величин тепловых потоков и коэффициентов теплопередачи для фторопластовых трубок диаметром 0,0038 × 0,0004 м и 0,0062 × 0,0006 м.

Теплофизические свойства кипящих жидкостей также заметно влияют на механизм и интенсивность процесса теплообмена при кипении. Азотная кислота относится к среднетемпературным жидкостям, температура кипения которых незначительно отличается от температуры кипения воды. Для таких жидкостей имеется большинство расчетных соотношений. Так, при проведении испытаний фторопластового кипятильника выявлено, что для определения коэффициента теплоотдачи для кипящей 98 % – ной азотной кислоты при температуре 86 °С наиболее приемлема формула:

$$a_k = b \left( \frac{l^2 \cdot r_{ж}}{m \cdot d \cdot T_{кин}} \right)^{1/3} \cdot q^{2/3} \quad (9)$$

Существующую формулу можно легко преобразовать в более приемлемую для расчетов формулу:

$$a_k = 6,1 \cdot q^{0,67} \quad (10)$$

Коэффициент теплоотдачи для пара, конденсирующегося внутри горизонтальных трубок, с наиболее приемлемой точностью можно определить по формуле:

а) для трубок с внутренним диаметром 0,005 м

$$a_n = 92,7 \cdot q^{0,5} \quad (11)$$

б) для трубок с внутренним диаметром 0,003 м

$$a_n = 88 \cdot q^{0,5} \quad (12)$$

При анализе показателей коэффициента теплоотдачи и коэффициента теплопередачи для кипятильника с нагревательными элементами из фторопластовых труб с внутренним диаметром 0,003 м и 0,005 м определено, что кипятильник с нагревательными элементами из фторопластовых труб с внутренним диаметром 0,003 м имеет эти теплотехнические показатели выше, чем кипятильник с нагревательными элементами из фторопластовых труб с внутренним диаметром 0,005 м при одинаковых расходах исходного раствора, пара и состава исходного раствора.

Этим подтверждается правильность теоретических предпосылок, изложенных выше.

*Поступила в редколлегию 25.03.10*

УДК 66.048.36.001.5:661.48

**В.Н. КОЛОМИЕЦ**, канд. техн. наук,  
**Ю.Б. ДАНИЛОВ**, докт. техн. наук,  
**М.А. ХАРЧЕНКО**, канд. техн. наук, ОАО «УкрНИИхиммаш»,  
г. Харьков, Украина

## **АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ФТОРПЛАСТОВЫХ ДЕФЛЕГМАТОРОВ И ПУТЕЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИХ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ**

У роботі приведена конструкція фторопластового дефлегматора та описані принцип його роботи й показники ефективності його застосування в колонних апаратах. Також показані перспективні сфери застосування фторопластових дефлегматорів.

В работе приведена конструкция фторопластового дефлегматора, дано описание принципа его работы и показателей эффективности при его использовании в колонных аппаратах. Также показаны перспективные области применения фторопластовых дефлегматоров.

The construction of fluoroplastic dephlegmator is in-process resulted, description of principle of his work and indexes of efficiency is given at his use in колонних апаратах. Perspektivne application of fluoroplastic dephlegmators domains are also rotined.